

结合波形互相关的双差定位方法在2011年 盈江地震序列中的应用*

黄浩¹, 付虹²

(1. 青海省地震局 都兰地震台, 青海 都兰 816100; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 选取2010年12月10日至2011年10月24日盈江地区发生的1458次地震, 利用结合了波形互相关技术的双差定位法对其进行定位, 最终获得1048次地震的震源参数。统计定位误差(两倍标准偏差)在EW向为58 m, NS向为34 m, 垂直方向为93 m。结果表明:(1) 重定位后, 震中位置明显集中, 主要在NE—SW向呈条带状(长约10 km)分布, 另外还在SSE向优势分布;(2) 前震和余震的震中分布存在显著差异, 前震仅在大盈江断裂两侧呈NE—SW向条带分布, 而余震不仅在NE—SW向分布, 还在大盈江断裂中段和北东段转折处向SSE向迁移;(3) 主震发生在断裂转折处及前震在震源区往返跳动的现象, 可能是由于断裂转折处属于构造脆弱区、地应力易于集中造成的; 最大强余震震源机制的明显变化及余震新的优势分布, 可能反映了余震活动除了受区域应力场控制外, 还受到主震引发的局部应力场控制;(4) 在相同区域应力场的控制下, 深度沿大盈江断裂的分布具有分段性, 即深度在相邻的AA'剖面SW段和BB'剖面NW段都分布在1~9 km, 而在AA'剖面NE段主要集中在6~9 km。

关键词: 双差定位; 波形互相关; 震源参数; 盈江地震

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)02-0210-06

0 引言

2011年3月10日, 云南省盈江县(24.7°N, 97.9°E)发生5.8地震(简称盈江地震), 极震区烈度达到Ⅷ度(房立华等, 2011), 造成了重大的经济损失和人员伤亡。主震发生后, 众多研究人员相继对盈江序列的前兆变化(付虹等, 2012)、地震定位(房立华等, 2011; 陈佳等, 2012)、震源机制(赵小艳等, 2012)开展了大量的跟踪和研究工作, 获得了很多重要的认识。付虹等(2012)、赵小艳等(2012)分别利用Snoke方法和CAP方法研究了盈江序列部分地震的震源机制, 认为该序列的震源机制具有较好的一致性。

震源机制一致性较好表明波形的相似度高, 而波形互相关的理论基础正是假定发震机理相同的地震波形具有相似性。波形互相关可以大幅提高震相到时的读数精度, 并在很大程度上降低通过人工读取震相获得相对走时的误差(黄媛, 2008)。将波形互相关与双差定位(Waldhauser,

Ellsworth, 2000; 杨智娴, 2003)结合起来可以大幅提高地震定位的精度, 该方法在国内外已有应用并显示出其优越性(Hauksson, Shearer, 2005; Waldhauser, Schaff, 2008; 赵翠萍, 2006)。

盈江地震发生在云南西南边境附近, 台站均位于震中东侧, 房立华等(2011)、陈佳等(2012)进行双差定位时仅使用了台站的目录到时数据。引入波形互相关技术后, 通过对大量地震波形数据进行互相关分析, 不仅可以提高事件对之间到时差的精度, 还能增加参与双差定位的到时数据, 有利于提高定位的精度, 降低因台站分布不佳造成的误差。因此, 本文采用结合波形互相关的双差定位方法对盈江序列进行重新定位, 对现有定位结果进行比较和补充, 分析和探讨盈江地震的时空分布特征。

1 双差定位方法

1.1 原理

双差定位法是一种多事件联合的相对定位方

* 收稿日期: 2013-08-22.

基金项目: 云南省人民政府“十项重大措施”地震监测预报(jcyb-20080601-05)项目资助。

法。对于地震 i 、 j 到达台站 k 的走时 t_k^i 、 t_k^j , 引入下式

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij}. \quad (1)$$

式中, Δm^i 是第 i 个地震震源参数的改变量,

$$\Delta m^i = (\Delta dx^i, \Delta dy^i, \Delta dz^i, \Delta dx^r) \quad (2)$$

dr_k^{ij} 即是所谓的双差,

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}. \quad (3)$$

其中: $(t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}}$ 是实际观测走时差, $(t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}$ 为理论计算走时差。将所有地震 ($i, j = 1, 2, \dots, N$), 所有台站 ($k = 1, 2, \dots$) 都得到如 (1) 式的方程, 采用矩阵表示为

$$\mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{m} = \mathbf{W} \mathbf{d}. \quad (4)$$

式中, \mathbf{G} 是一个 $M \times 4N$ 阶的偏微商矩阵, M 是双差观测的数目, N 是地震数; \mathbf{d} 是双差资料矢量, \mathbf{m} 是由待定震源参数改变量构成的维数为 $4N$ 的矢量; \mathbf{W} 是用以对每个方程加权的对角线矩阵。

计算时利用下式约束所有地震重新定位后平均位移为零, 即其质心不动。通过进一步迭代, 使定位残差逐步减小, 从而得到最终的定位结果。

$$\sum_i^N \Delta m^i = 0. \quad (5)$$

1.2 数据和模型选取

选取盈江前震和余震序列中的 1 458 次 $M_L \geq 1.0$ 地震, 共计 22 172 条 P 波和 S 波到时数据, 引入波形互相关技术, 对其中 424 次 $M_L \geq 2.0$ 地震进行互相关分析, 获得了 144 549 条相关系数 0.7 以上的高精度相对到时数据。所选震相数据和初始定位结果来自云南数字地震台网观测报告, 每个地震保证至少有 8 个震相记录, 且使用的初至波均为直达波。在进行互相关计算时, 考虑到小震信噪比差, 波形特征被噪声掩盖, 选取 $M_L \geq 2.0$ 地震。盈江序列以小震为主, 因此选取了震中距小于 200 km 的 9 个台站的地震波形记录进行互相关分析 (图 1)。所选台站的数据均为宽频带数字地震记录, 采样率 100 Hz。

由于盈江地区缺乏速度结构的精细研究, 房立华等 (2011) 参考胡鸿翔等 (1986)、张中杰等 (2005) 的人工地震测深结果对盈江地震的余震序

列进行了双差定位, 并取得了较准确的余震定位结果。本文使用该速度结构模型进行重定位, 波速比设定为 1.76, 模型详细参数见表 1。

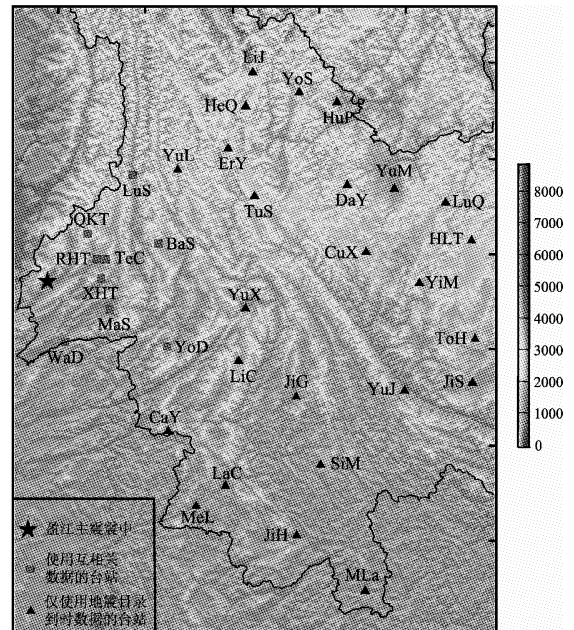


图 1 盈江序列重定位使用的台站

Fig. 1 Seismic stations used in the relocation of Yingjiang earthquake sequence

表 1 盈江地区水平层状地壳速度模型

Tab. 1 Horizontal layered crustal velocity model in Yingjiang area

深度/km	0	1	14	18	30	30	60
$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	5.0	6.1	6.4	6.6	7.2	8.0	8.1

2 波形互相关

波形互相关是按照发震机理相同地震波形相似的原理, 通过对相似地震波形进行互相关分析, 来计算同一震相的走时差, 主要有时间域和频率域两种方式 (Poupinet *et al*, 1984)。通过时间域 (频率域) 相关函数计算相似波形的相关系数, 设定相关系数阈值, 获取可用的到时差数据。

本文的波形互相关是在时间域中完成的, 假设 $f(t)$ 、 $g(t)$ 为时域中两列波形, 则可在时域中计算延迟时间, 其互相关系数为

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t + \tau) d\tau / \left(\int_{-\infty}^{\infty} f^2(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{\infty} g^2(\tau) d\tau \right)^{1/2}. \quad (6)$$

式中, t 为两列波形的延迟时间。在互相关计算之

前对波形资料做以下处理：首先，将波形资料在 1 ~ 10 Hz 范围内滤波，分别在 Pg 波与 Sg 波到时前后取一段波形进行波形互相关分析。P 波窗长取 1.2 s，即初至 P 波前 0.2 s 至初至 P 波后 1 s；S 波窗长取 2 s，即初至 P 波前 0.5 s 至初至 P 波后 1.5 s。通过互相关计算，最终获得了 144 549 条互相关系数 0.7 以上的到时差数据。图 2 是 3 个台站记录的两对地震的波形记录，两对地震的波形几

乎完全一致，表明本文采用波形互相关技术提取的到时差数据准确、可靠。笔者按照人工标识的 Pg 波到时绘图，可以看出，由于初动起始位置不清楚、振幅小，事件对 2 中 RHT 台、XHT 台人工标识的到时存在较明显的误差（图 2，表 2）。通过互相关分析，可以得到事件对精确的走时差，降低初动标识的人为误差，结合双差定位进一步提高定位的精度。

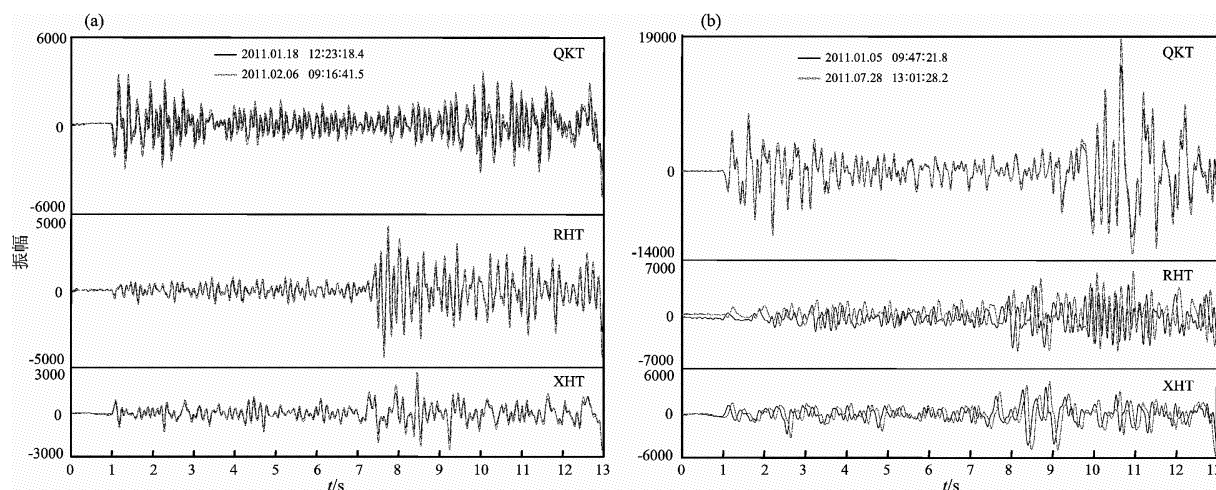


图 2 3 个台站记录的两对地震的波形

Fig. 2 Waveforms of 2 pairs of earthquakes recorded by 3 stations respectively

表 2 图 2 中两对地震的详细信息
Tab. 2 Detailed information of 2 pairs of earthquakes showed in Fig. 2

台 震 站 相	事件对 1				事件对 2			
	2011/01/18 12:23:18 M_L 2.1				2011/01/05 09:47:21 M_L 2.8			
	2011/02/06 09:16:41 M_L 2.1				2011/07/28 13:01:28 M_L 2.9			
	互相关系数	延迟时间/s	互相关系数	延迟时间/s	互相关系数	延迟时间/s	互相关系数	延迟时间/s
XHT P	0.96	0.01	0.95	0.09				
XHT S	0.97	0.18	0.81	0.30				
RHT P	0.92	0.01	0.76	0.12				
RHT S	0.99	0.00	0.98	0.00				
QKT P	0.97	-0.01	0.98	0.00				
QKT S	0.98	0.01	0.94	-0.15				

3 重定位结果

应用结合波形互相关的双差定位重新定位后，得到 1 048 次地震的震源参数，其中前震 508 次，余震 539 次。重定位后，震中位置相对初始位置明显集中。震中分布在大盈江断裂两侧，呈现两个

优势方向，一支跨越大盈江断裂呈 NE—SW 向条带状（长约 10 km）分布，另一支在大盈江断裂中段和北东段转折处呈 SSE 向分布（图 3）。

考虑到前震和余震分布的显著差异，笔者对盈江序列沿 AA' 和 BB'（两个优势方向）做了震源深度剖面（图 4）。震源深度结果显示，深度在 AA' 剖面 SW 段较分散且少数地震趋近地表，深度分布在 1 ~ 9 km，而在 AA' 剖面 NE 段较收敛，深度主要集中在 6 ~ 10 km；地震在 BB' 剖面 NW 段较分散，深度也分布在 1 ~ 9 km，在 BB' 剖面中段及 SE 段分布稀疏。

4 盈江序列地震活动的演化

盈江主震发生在大盈江断裂带西侧，钱晓东等（2011）、赵小艳等（2012）依据烈度、震中分布以及精定位判定大盈江断裂为盈江主震的发震断层。大盈江断裂走向 $N40^\circ \sim 75^\circ E$ ，主体倾向 NW，局部 SE，倾角较陡，彼此呈左阶羽列展布。其中，NE 段对梁河盆地、盈江盆地有明显控制作

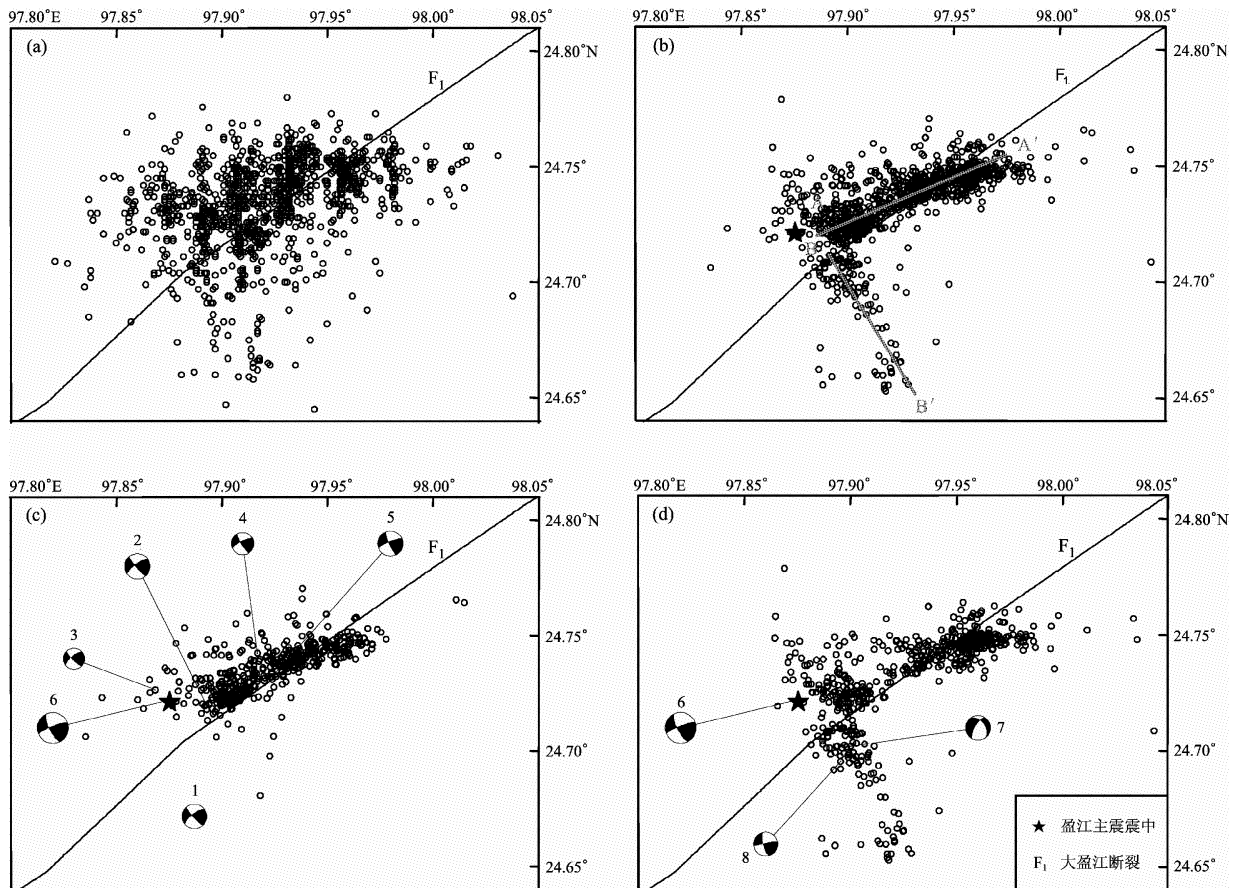


图3 定位结果比较

(a) 云南台网的初始定位结果; (b) 盈江序列结合波形互相关的双差定位结果; (c) 盈江前震序列结合波形互相关的双差定位结果及部分震源机制解; (d) 盈江余震序列结合波形互相关的双差定位结果及部分震源机制解

Fig. 3 The comparison of relocation results

(a) initial location results provided by Yunnan Seismic Network; (b) double difference location results of Yingjiang earthquake sequence combined with waveform cross-correlation; (c) double difference location results of Yingjiang foreshock sequence combined with waveform cross-correlation and part of focal mechanism; (d) double difference location results of Yingjiang aftershock sequence combined with waveform cross-correlation and part of focal mechanism

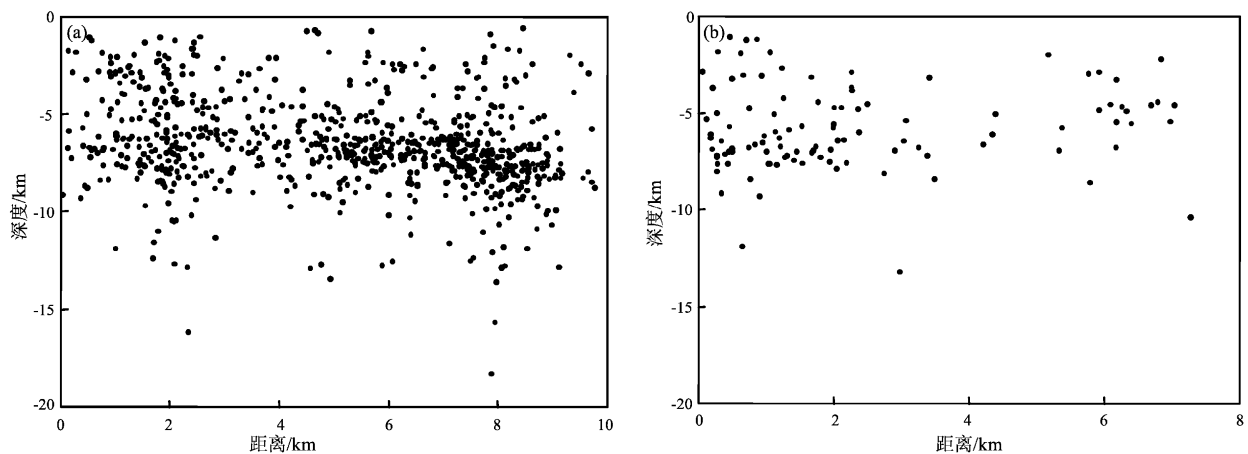


图4 重定位后盈江地震序列震源深度在AA' (a)、BB'剖面 (b) 的深度分布

Fig. 4 Epicenter depths distribution of the relocated Yingjiang earthquake sequence along profile AA' (a), BB' (b)

用,断裂走向 $N30^{\circ} \sim 50^{\circ}E$,长约 90 km,为晚更新世—全新世活动段(常祖峰等,2011)。

盈江前震和余震分布的显著差异,应与其震源机制存在紧密的联系,故笔者收集了盈江 $M_s \geq 4.0$ 地震的震源机制解(赵小艳等,2012),并结合本文的精定位结果给出了这些地震的震源机制解及其空间分布(图 3c、d),分析和探讨盈江前震及余震活动的演化。

从图 3c 可以看出,前震及主震均为纯走滑型,主压应力为 NNE—SSW 水平向,表明前震及主震是大盈江断裂在 NNE—SSW 压应力作用下产生左旋走滑错动的结果。除 1 号地震震中离前震区稍远外,2~5 号前震及主震在前震区呈线性分布,从时间进程来看,震中没有单一的迁移方向而是在前震区往返跳动。主震发生在前震区边缘,位于大盈江断裂中段和北东段转折处。断裂转折处往往是构造脆弱和地应力易于集中的部位,这可能是主震发生在前震区边缘和前震震中往返跳动的原因。

余震除在前震震区分布外,还在两次 4 级余震震中附近发生多次小震,形成新的优势分布。7 号 $M_s 4.7$ 地震为最大强余震,是具有正断性质的走滑型,而 8 号余震仍为纯走滑型。最大强余震的震源机制变化明显,而其它 4 级余震的震源机制未发生变化,结合余震新的优势分布,表明主震后的区域应力场既与主震前具有相同的特征,又出现新的变化,可能反映了余震活动除了受区域应力场控制外,还受到主震引发的局部应力场的控制。

5 讨论与结论

本文应用双差定位方法,使用盈江序列中 1 458 次 $M_L \geq 1.0$ 且包含 8 个以上震相记录的地震,并引入波形互相关技术,对其中 424 次 $M_L \geq 2.0$ 地震进行互相关分析,获得了 144 549 条相关系数 0.7 以上的高精度相对到时数据,最终联合目录和互相关到时数据重新定位了 1 048 次地震的震源参数,其中前震 508 次,余震 539 次。重定位后,震中位置的测定误差(两倍标准偏差)在 EW 向为 58 m,NS 向为 34 m,垂直方向为 93 m。互相关技术的引入,降低了人工读取震相到时引起的误差,大幅增加了参与定位的到时数据,提高了定位的精度。

重定位后,震中位置明显集中,主要在 NE—

SW 向呈条带状(长约 10 km)分布,另外还在 SSE 向优势分布。前震和余震的震中分布存在显著差异,前震仅在大盈江断裂两侧呈 NE—SW 向条带分布,而余震不仅在 NE—SW 向分布,还在大盈江断裂中段和北东段转折处向 SSE 向迁移。

结合前震和余震的精确位置、震源机制以及断层性质,分析盈江序列的地震活动后发现:从时间进程来看,前震没有单一的迁移方向而是在前震区往返跳动,主震则发生在前震区边缘,位于断裂转折处,这可能是由于断裂转折处属于构造脆弱区、地应力易于集中造成的。余震除在前震震区分布外,还在 SSE 向形成新的优势分布。最大强余震的震源机制变化明显,而其它 4 级余震的震源机制未变化,结合余震新的优势分布,表明主震后的区域应力场既与主震前具有相同的特征,又出现新的变化,可能反映了余震活动除了受区域应力场控制外,还受到主震引发的局部应力场的控制。

在相同区域应力场的控制下,深度沿大盈江断裂的分布具有分段性,即深度在相邻的 AA'剖面 SW 段和 BB'剖面 NW 段都分布在 1~9 km,而在 AA'剖面 NE 段主要集中在 6~9 km。这可能表明前者的地下介质较松散,而后者较致密。房立华等(2011)对主震后 66 小时的余震进行了双差定位,发现多数余震分布在大盈江断裂中段与北东段交界处,认为此处的介质性质较为软弱,有利于余震的扩散,这与笔者得出的结论一致。

在水平方向上,本文重定位得到的震中分布特征与其它学者相符合(房立华等,2011;赵小艳等,2012;陈佳等,2012),而在深度方向上,本文重定位的结果显示出更丰富的细节特征。盈江地震的震源机制一致性较好,通过互相关分析能够在一定程度上提高定位的精度,在深度上显示出常规定位未发现的细节。

云南数字地震台网为本研究提供了速报目录、地震观测报告和波形资料,并得到了中国地震局地震预测研究所李乐博士在波形互相关计算方面的指导,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

- 常祖峰,陈刚,余建强. 2011. 大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据[J]. 地震地质,33(4):877-888.
陈佳,杨军,叶泵,等. 2012. 2011 年盈江 $M_s 5.8$ 地震前震及余震序列双差定位研究[J]. 国际地震动态,(6):177.

- 房立华,吴建平,张天中,等.2011.2011年云南盈江 $M_s5.8$ 地震及其余震序列重定位[J].地震学报,33(2):262-267.
- 付虹,黄浩,李丽,等.2012.2011年3月10日云南盈江5.8级地震序列研究[J].地震研究,34(4):414-419.
- 胡鸿翔,陆涵行,王椿镛,等.1986.滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J].地球物理学报,29(2):133-134.
- 黄媛.2008.结合波形互相关技术的双差算法在地震定位中的应用探讨[J].国际地震动态,(4):29-34.
- 钱晓东,苏有锦,付虹,等.2011.2011年云南盈江5.8级地震及震前短临跟踪[J].地震研究,34(4):403-413.
- 杨智娴,陈运泰,郑月军,等.2003.双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J].中国科学,33(增刊):129-134.
- 张中杰,白志明,王椿镛,等.2005.冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构:以滇西孟连—马龙宽角反射剖面为例[J].中国科学(D辑:地球科学),35(5):387-392.
- 赵翠萍.2006.1997-2003年伽师震源区特征的地震学方法研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所:1-166.
- 赵小艳,韩立波,龙峰.2012.2011年盈江 $M_s \geq 4.0$ 地震序列震源机制解与发震构造研究[J].地震研究,35(4):477-484.
- Hauksson E., Shearer P. .2005. Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation, part 1: Results using the double-difference method[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 95(3): 896-903.
- Poupinet G., Ellsworth W. L., Frechet J. .1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault California[J]. J. Geophys. Res., 89(B7): 5719-5731.
- Waldhauser F., Ellsworth W. L. .2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward fault, California[J]. BSSA, 90(6): 1353-1368.
- Waldhauser F., Schaff D. P. .2008. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods[J]. J. Geophys. Res., 113, B08311, doi:10.1029/2007JB005479.

Application of Double-difference Relocation Technique Combined with Waveform Cross-correlation on Yingjiang Earthquake Sequence in 2011

HUANG Hao¹, FU Hong²

(1. Dulan Seismic Station, Earthquake Administration of Qinghai Province, Dulan 816100, Qinghai, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Collecting and relocating 1 458 earthquakes in Yingjiang area from Dec. 10, 2010 to Oct. 24, 2011 by using double-difference method combined with waveform cross-correlation, the source parameter of 1 048 earthquake was obtained finally, and the statistical location errors (two times of mean square deviation) are 58 m in EW, 34 m in NS and 93 m in vertical direction respectively. The results show that: (1) The relocated epicenter concentrated obviously, had a banding distribution in NE-SW (the length of band is about 10 km) and dominantly distributed in SSE trend. (2) There was a significant difference in the epicenter distribution of foreshock and aftershock. The foreshock only distributed in both side of the Dayingjiang Fault and had a banding distribution in NE-SW trend, however the aftershock distributed not only along NE-SW trend but also migrated in SSE trend at the junction between the middle and the northeast segment of the Dayingjiang Fault. (3) The phenomenon of main shock occurred near the junction of the fault and epicenter of foreshock jumped back and forth at the epicenter region, which might be caused by fault junction belonged to fragile area and the stress was easy concentrated. The obvious variation of focal mechanism of maximum aftershock and the new advantage distribution of the aftershock might reflect that the aftershock activity was under the control of the regional stress field and the local stress field caused by main shock. (4) Under the controlling of the same stress field, the distribution of the focal depths shows different segment characteristics along Dayingjiang Fault. The focal depth distributes in the range of 1~9 km at the southwest segment of AA' profile and northwest segment of BB' profile, however it mainly distributes in the range of 6~9 km at the northeast of AA' profile.

Key words: double-difference location; waveform cross-correlation; source parameter; Yingjiang earthquake